Transferencias II

UNIDAD 3

Humidificación

PROF. ING. MARIO SMIDT

INGENIERÍA INDUSTRIAL

Universidad Católica

"Nuestra Señora de la Asunción"

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA

2016

Transferencias II

HUMIDIFICACIÓN

Transferencias II

HUMIDIFICACIÓN

HUMIDIFICACIÓN

INTRODUCCIÓN

Generalidades

Al hablar de humidificación se hace referencia al estudio de mezclas de **aire** y **vapor de agua**, aplicables a cualquier tipo de mezclas constituidas por un **gas** y un **vapor**.

Suponiendo que el comportamiento de la mezcla cumple con las **leyes de los gases ideales**, la **presión total ejercida por la mezcla** será igual a la suma de la **presión parcial del gas** y la **presión parcial del vapor:**

$$P = p_v + p_g$$

En estas condiciones la **fracción molar del vapor** es:

$$y = \frac{n_v}{n_t} = \frac{p_v}{P}$$

Es decir, la fracción molar es igual a la **composición en volumen**. Para expresar la concentración del **vapor** en el **gas** se emplean diversos términos que definiremos a

HUMIDIFICACIÓN

INTRODUCCIÓN

Humedad molar o saturación molar

Es la relación entre los números de moles de **vapor** y de **gas** contenidos en una **determinada masa gaseosa**.

$$Y_m = \frac{n_v}{n_g} = \frac{p_v}{p_g} = \frac{p_v}{P - p_v}$$

Humedad absoluta o saturación absoluta

Es la relación entre el **peso de vapor** y el **peso de gas** contenido en una **determinada masa gaseosa**.

$$Y = \frac{M_v}{M_g} Y_m = \frac{M_v}{M_g} \cdot \frac{p_v}{P - p_v}$$

Para el caso de la mezcla **aire-agua**, tomando para el aire un **peso molecular medio** igual a **29**, tendremos

$$Y = \frac{\mathbf{18}}{\mathbf{29}} \cdot \frac{p_v}{P - p_v} = \mathbf{0{,}62} \cdot \frac{p_v}{P - p_v}$$

HUMIDIFICACIÓN

INTRODUCCIÓN

Ejemplo 4.1- Ocon Tojo

- En una mezcla de vapor de tolueno y nitrógeno a 80°C y 740 mmHg, la presión parcial del tolueno es 150 mmHg. Calcúlese la concentración del tolueno:
- a) En fracción molar.
- b) En saturación molar.
- c) En saturación absoluta.
- Peso molecular del tolueno= 92.
- Peso molecular del nitrógeno= 28.

HUMIDIFICACIÓN

INTRODUCCIÓN

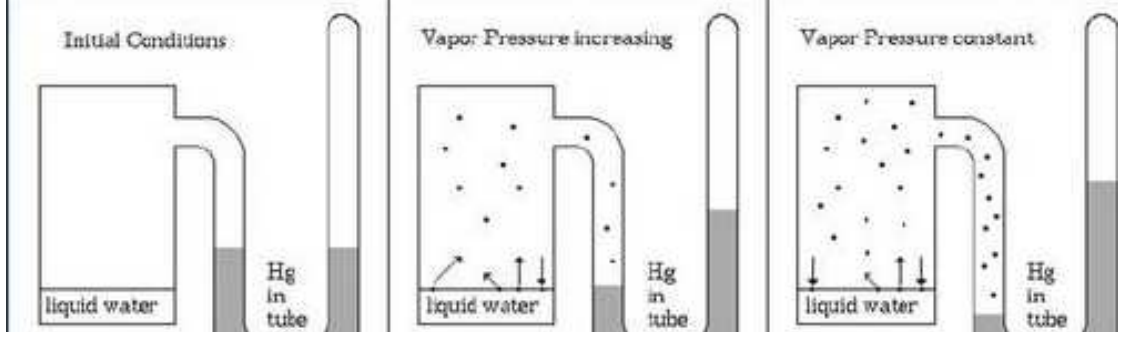
Humedad relativa o saturación relativa

Es el cociente entre la **presión parcial del vapor** y la **tensión de vapor** a la misma temperatura.

$$\varphi = \frac{p_v}{p_v^*}$$

La **presión de vapor** se define como aquella presión a la cual **un líquido en estado puro y su vapor están en equilibrio** a una determinada temperatura. Esta propiedad se incrementa cuando la temperatura aumenta, y viceversa.

La presión de vapor es la presión ejercida por el vapor de una sustancia sobre su fase líauida.



HUMIDIFICACIÓN

INTRODUCCIÓN

Humedad porcentual o saturación porcentual

Es la relación entre la humedad existente en la masa gaseosa y la que existiría si estuviera saturada.

$$\varphi_p = \frac{Y}{Y^*} = \frac{p_v}{p_v^*} \cdot \left(\frac{P - p_v^*}{P - p_v} \right)$$

Ejemplo 4.3- Ocon Tojo

- Una mezcla aire-vapor de agua contiene 24% en volumen de vapor de agua a 70°C y 750 mmHg. Calcúlese la humedad relativa y la humedad porcentual.

HUMIDIFICACIÓN

INTRODUCCIÓN

Punto de rocío

Es la temperatura que alcanza la masa de **gas húmedo** en la **saturación** por **enfriamiento** a **presión constante**.
Una vez alcanzada esta temperatura, **si se continúa enfriando** la mezcla irá **condensando vapor**, persistiendo las condiciones de saturación.

Volumen específico del gas húmedo

Es el volumen ocupado por la mezcla que contiene 1 kg de gas, y viene dada por

$$V = \left(\frac{1}{M_g} + \frac{Y}{M_v} \right) \cdot \frac{RT}{P}$$

Para el caso de la mezcla **aire-vapor de agua**, expresando P en atmósferas y T en Kelvin, el **volumen específico** (m^3/kg AS) viene dado por

$$V = \left(\frac{1}{} + \frac{Y}{} \right) \cdot \frac{0{,}082T}{}$$

HUMIDIFICACIÓN

INTRODUCCIÓN

Calor específico del gas húmedo

Es el calor que hay que suministrar a 1 kg de gas y al vapor que contiene para elevar 1°C su temperatura, manteniendo constante la presión.

$$c = (c_p)_g + (c_p)_v Y$$

Para el caso **aire-vapor de agua**

$$c = 0{,}24 + 0{,}46Y$$

Entalpía específica

Es la suma del calor sensible de 1 kg de gas, y el calor latente de vaporización que contiene a la temperatura a la que se refieran las entalpías.

$$i = c(t - t_0) + \lambda_0 Y$$

Para el caso aire-agua, tomando como entalpía de referencia la del agua líquida a 0 °C,

$$i = (0{,}24 + 0{,}46Y)t + 597{,}2Y$$

HUMIDIFICACIÓN

INTRODUCCIÓN

Ejemplo 4.4- Ocon Tojo

- La presión parcial del vapor de agua en una masa de aire húmedo a 30°C y 740 mmHg es 14 mmHg. Calcúlese:
- a) El punto de rocío.
- b) La humedad absoluta.
- c) El calor específico.
- d) El volumen específico.
- e) La entalpía específica.

HUMIDIFICACIÓN

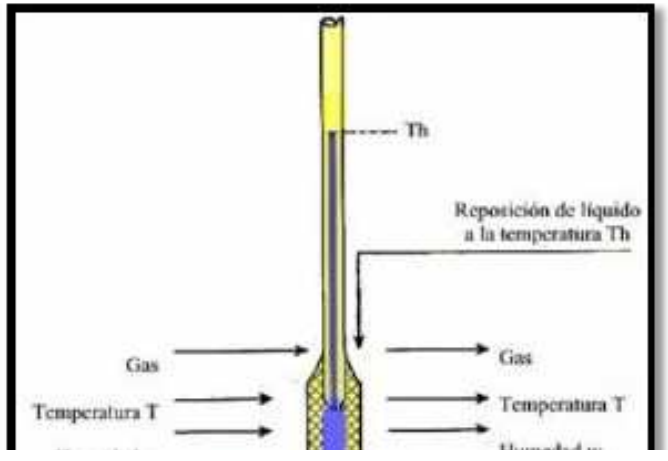
INTRODUCCIÓN

Temperatura de bulbo seco

Ésta es la temperatura del aire medida con un termómetro, termopar u otro instrumento convencional para medir la temperatura.

Temperatura húmeda o temperatura de bulbo húmedo

Esta cantidad se define mejor en términos de la manera en que se mide. Un material poroso, como tela o algodón, se empapa en agua y se envuelve al bulbo de un termómetro con él para formar una mecha, y el termómetro se coloca en una corriente de aire que fluye.



HUMIDIFICACIÓN

INTRODUCCIÓN

Temperatura húmeda o temperatura de bulbo húmedo

La evaporación del agua de la mecha al aire que fluye va acompañada de una **transferencia de calor del bulbo**, lo cuál, a su vez, provoca el **descenso de la temperatura del bulbo**, y en consecuencia en la lectura del termómetro.
A condición de que la mecha permanezca húmeda, la temperatura del bulbo caerá hasta cierto valor y permanecerá allí. La lectura final es la temperatura de bulbo húmedo del aire que pasa sobre la mecha.
Es la temperatura límite de enfriamiento alcanzada por una pequeña masa de líquido en contacto con una masa mucho mayor de gas húmedo.

Temperatura de saturación adiabática

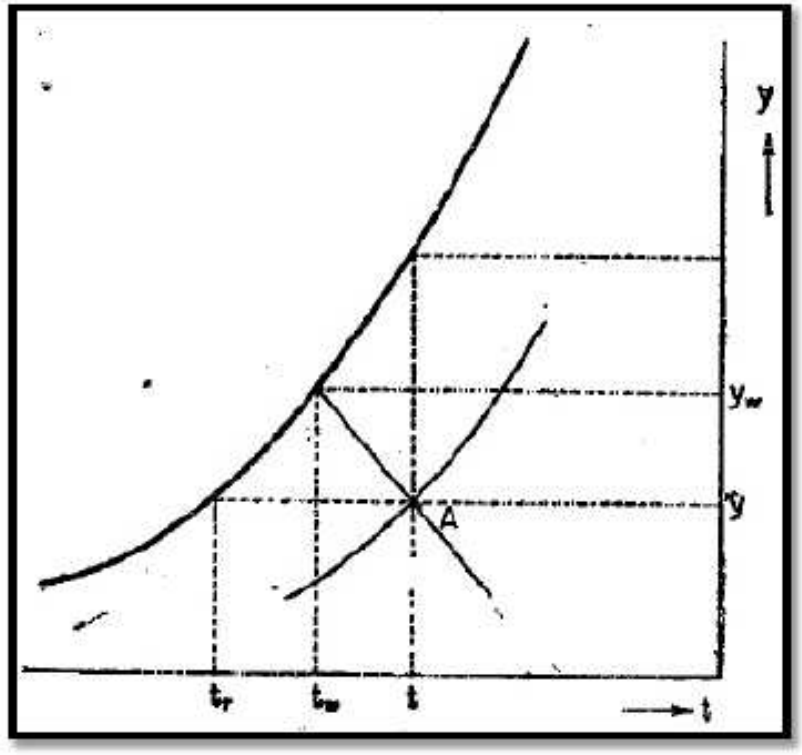
Es la temperatura alcanzada por una masa de gas cuando se pone en contacto con un líquido en condiciones adiabáticas. *Es la máxima temperatura a la que puede llegar una masa gaseosa, en condiciones adiabáticas, alcanzando un contenido máximo de humedad.*

HUMIDIFICACIÓN

DIAGRAMA PSICROMÉTRICO

Es una representación gráfica de las ecuaciones analíticas indicadas anteriormente.

En este diagrama se representa la **humedad absoluta** en **ordenadas** frente a su **temperatura de bulbo seco** en abscisas.



Está limitado por la **curva de humedad relativa del 100%** o **curva de saturación,** la cuál es la **humedad del aire saturado** en función de su **temperatura**.

Los puntos situados a la izquierda de la curva de saturación representan **mezclas de aire saturado** y **agua líquida** que originan la **formación de nieblas** y corresponden a condiciones inestables.

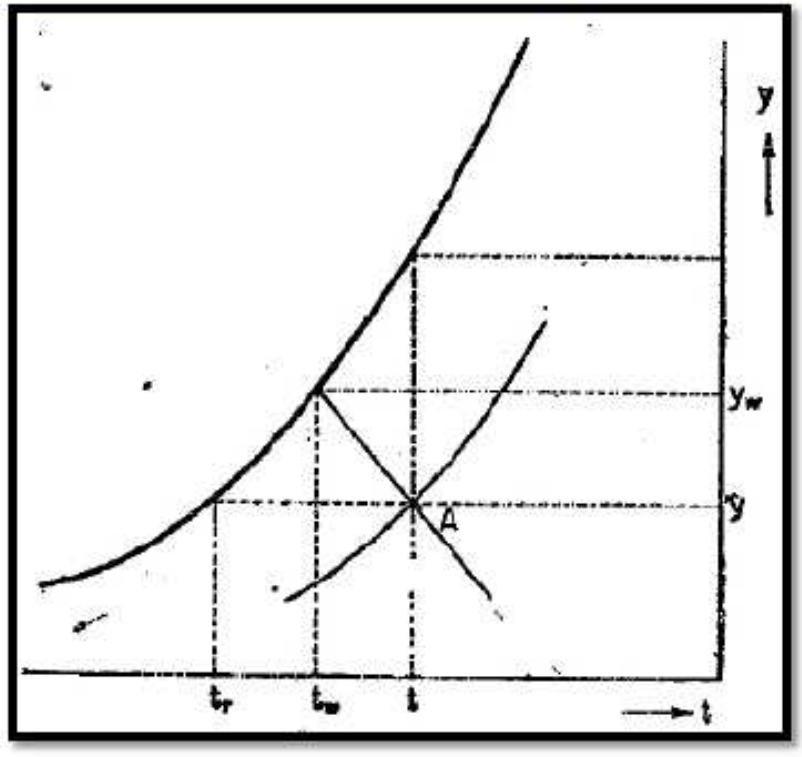
Cualquier punto situado a la derecha de esta curva representa una mezcla definida de **aire** y **vapor de agua** que corresponde a **condiciones de recalentamiento.**

HUMIDIFICACIÓN

DIAGRAMA PSICROMÉTRICO

Las curvas situadas entre el **eje de abscisas y la curva de saturación** son las **isolíneas** correspondientes a las **distintas humedades relativas**.

Las líneas inclinadas de pendiente negativa corresponden a las **isolíneas de temperatura de saturación adiabática** que coinciden con las de **temperatura de bulbo húmedo** para el caso de **aire-vapor de agua**.

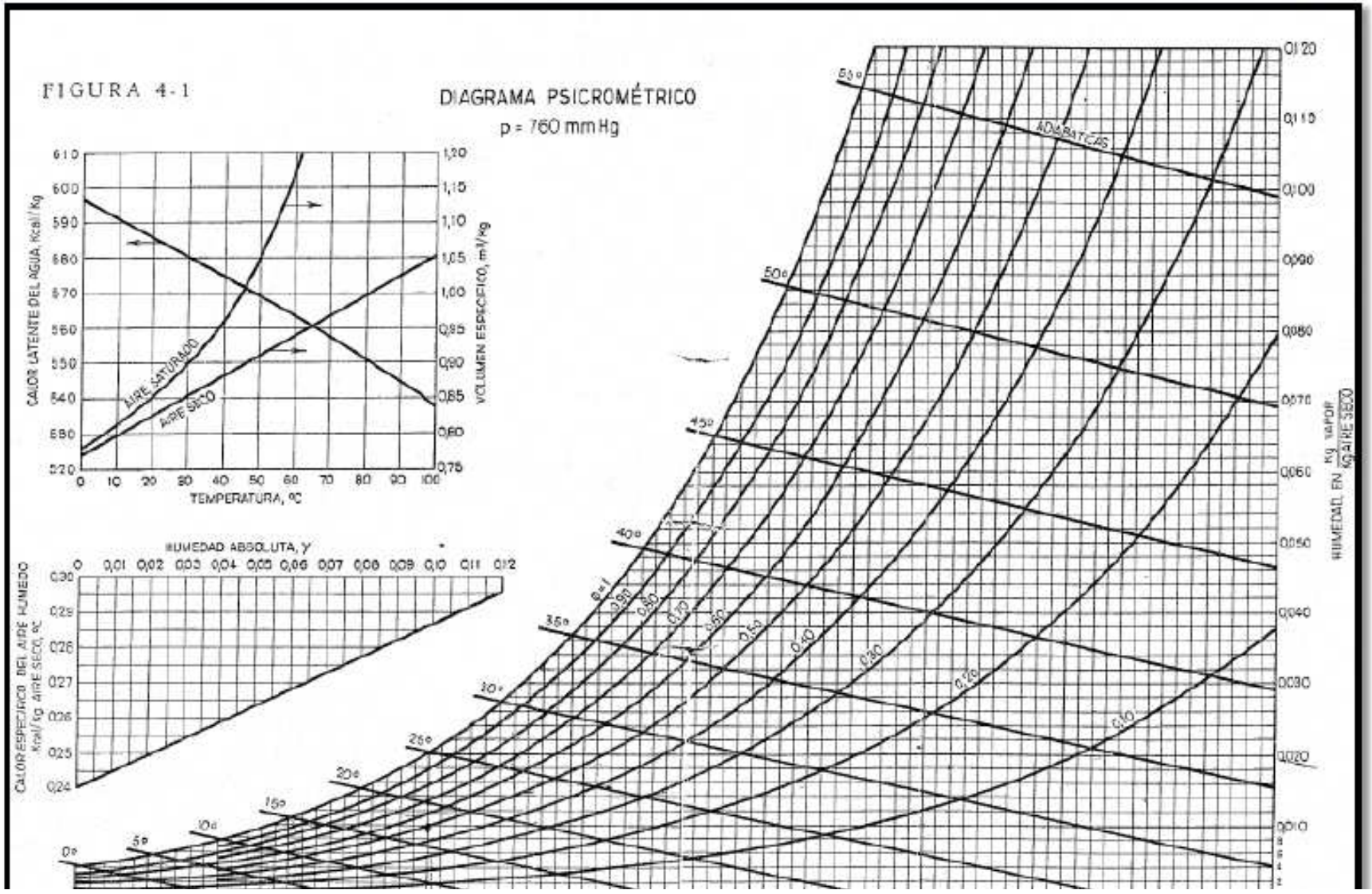


A este diagrama le acompañan las gráficas auxiliares para determinar el calor específico, el calor latente de vaporización, y los volúmenes específicos del aire seco y del aire saturado.

Aunque el diagrama está hecho para la presión de 1 atm, puede emplearse para otras presiones próximas a aquella.

HUMIDIFICACIÓN

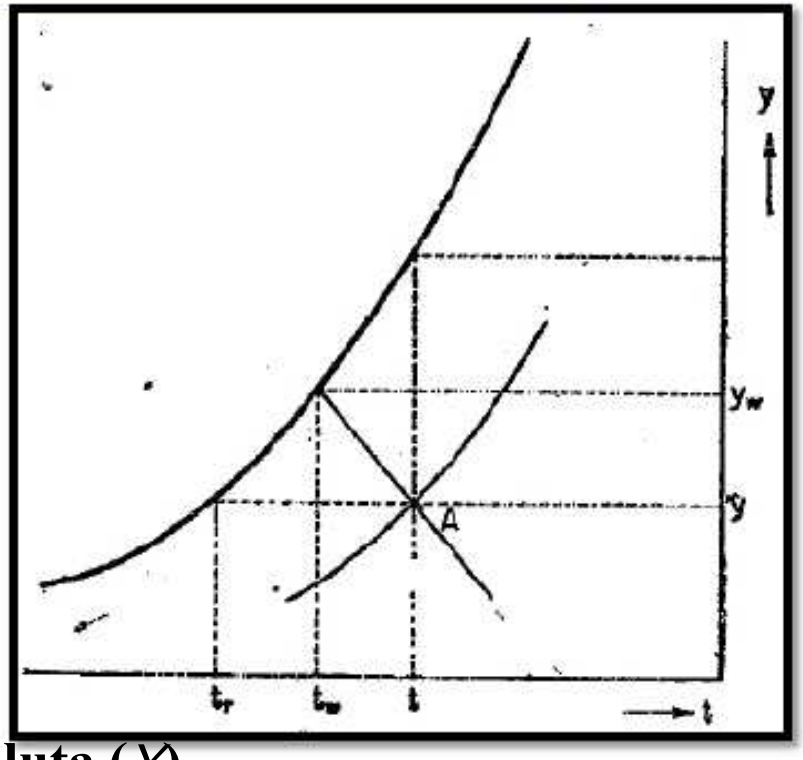
DIAGRAMA PSICROMÉTRICO



HUMIDIFICACIÓN

DIAGRAMA PSICROMÉTRICO

Manejo del diagrama psicrométrico



Para fijar un punto en este diagrama hemos de conocer dos de las cinco variables siguientes:

$$t, t_r, Y, t_w, \varphi$$

Fijado el punto en el diagrama, la determinación de las distintas magnitudes se realiza del siguiente modo:

Sea *A* el punto fijado:

a) La ordenada de este punto es la **humedad absoluta (*Y*).**
b) La abscisa es la **temperatura de aire (*t*).**
c) La abscisa del punto que, sobre la curva de saturación, tiene la misma ordenada **Y** es la **temperatura de rocío (t_r).**
d) La abscisa del punto de intersección de la línea inclinada que pasa por **A** con la curva de saturación es la **temperatura de saturación adiabática** o **temperatura**

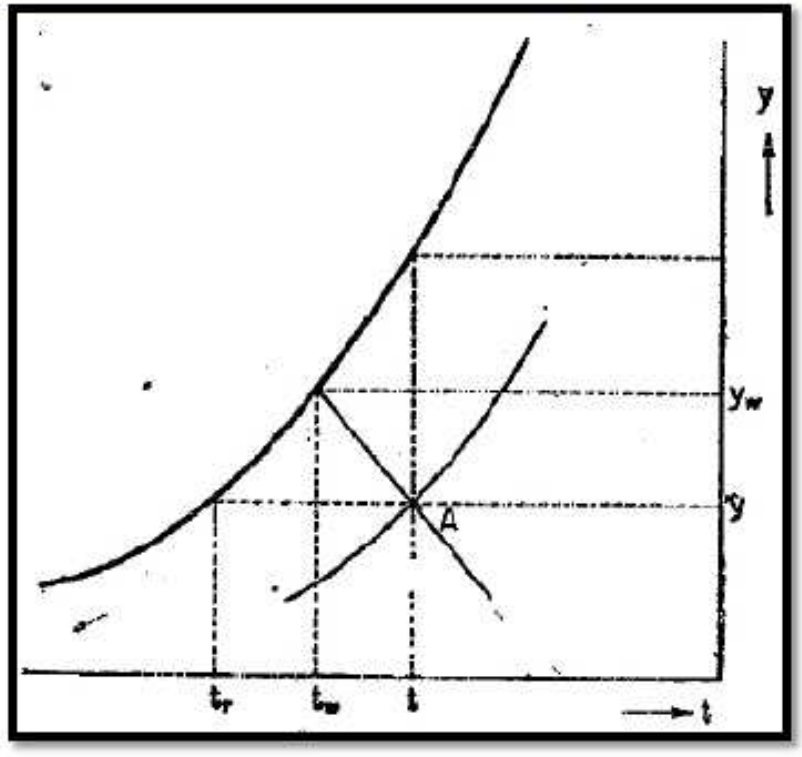
HUMIDIFICACIÓN

DIAGRAMA PSICROMÉTRICO

Manejo del diagrama psicrométrico

e) Prolongando la vertical que pasa por **A** hasta la curva de saturación, la ordenada del punto de intersección es la **humedad de saturación del aire** a la temperatura *t*.

f) La humedad relativa se lee directamente de las isolíneas.



Ejemplo 4.10- Ocon Tojo

- Una masa de aire a 40°C tiene una temperatura húmeda de 25°C. Empleando el diagrama psicrométrico calcule todas las propiedades del aire a las condiciones dadas.

HUMIDIFICACIÓN

MÉTODOS DE HUMIDIFICACIÓN

La práctica industrial de la humidificación del aire se realiza casi exclusivamente en las **columnas de humidificación adiabáticas**.

a) Mezcla de dos masas de gases húmedos

Si mezclamos adiabáticamente dos masas de gases húmedos con distintas humedades, el cálculo de las condiciones en que queda la masa de gas resultante puede efectuarse en función de las condiciones iniciales de las dos corrientes gaseosas.

$$Masa\ de\ gas, \rightarrow G = G_1 + G_2$$

$$Humedad, \rightarrow Y = \frac{G_1 Y_1 + G_2 Y_2}{G_1 + G_2}$$

$$Entalpía \rightarrow \frac{Y - Y_1}{i - i_1} = \frac{Y - Y_2}{i - i_2}$$

$$i = \frac{G_1 i_i + G_2 i_2}{G_1 + G_2}$$

$$Temperatura\ de\ la\ masa\ resultante \rightarrow t = \frac{G_1 t_i + G_2 t_2}{}$$

HUMIDIFICACIÓN

MÉTODOS DE HUMIDIFICACIÓN

Ejemplo 4.14- Ocon Tojo

- Disponemos de 1000 m^3 de aire a 50°C con t_w=30°C, y queremos que una vez mezclado con el aire ambiente, que se encuentra a 15°C y con φ=50%, la mezcla resultante esté a 25°C. Calcúlese:
- a) La humedad del aire resultante.
- b) El volumen de aire a acondicionar.
- c) El volumen de aire resultante.

HUMIDIFICACIÓN

MÉTODOS DE HUMIDIFICACIÓN

b) Adición de vapor saturado

Si adicionamos la masa M_v de vapor saturado con entalpía i_v a una masa de G de gas húmedo en las condiciones Y_1, i_i, t_1 por aplicación de un **balance de materia y entalpía** llegamos a las siguientes expresiones para la **humedad** y **entalpía resultantes**

$$Humedad \rightarrow Y = Y_1 + \frac{M_v}{G}$$

$$Entalpía\, i \rightarrow i = i_1 + i_v(Y - Y_1)$$

Ejemplo 4.15- Ocon Tojo

- Un recinto de 1000 m^3 que contiene aire a 25°C con una humedad absoluta de 0,009 kg de agua/kg de aire, se humidifica adiabáticamente adicionándole vapor de agua saturado a 1 atm, en cantidad tal que la humedad final obtenida después de la adición de vapor es 0,020 kg agua/kg de aire. Suponiendo que se homogeniza perfectamente la mezcla, sin haber condensación de vapor de agua sobre las paredes y sin pérdidas de calor al exterior, calcúlese:
- a) Cantidad de vapor de agua adicionado.

HUMIDIFICACIÓN

MÉTODOS DE HUMIDIFICACIÓN

c) Adición de un líquido que se evapora totalmente en la masa gaseosa

Las ecuaciones a las que llegamos en este caso por aplicación de un balance de materia y energía son análogas a la del caso anterior, sustituyendo las condiciones del vapor saturado por las condiciones del líquido.

d) Adición de un un líquido en condiciones cualesquiera, evaporándose parte del líquido

Consideremos una masa de aire G que pasa de las condiciones Y_1, i_1 a las condiciones Y_2, i_2 mientras que la cantidad de líquido inicial M_1 a t_{L1} se enfría hasta t_{L2} disminuyendo su masa M_2.

Por aplicación de un balance de masa y energía llegamos a las siguientes expresiones

$$G(Y_2 - Y_1) = M_1 - M_2$$

$$\frac{Y_2 - Y_1}{i_2 - i_1} = \frac{M_1 - M_2}{M_1 h_1 - M_2 h_2}$$

HUMIDIFICACIÓN

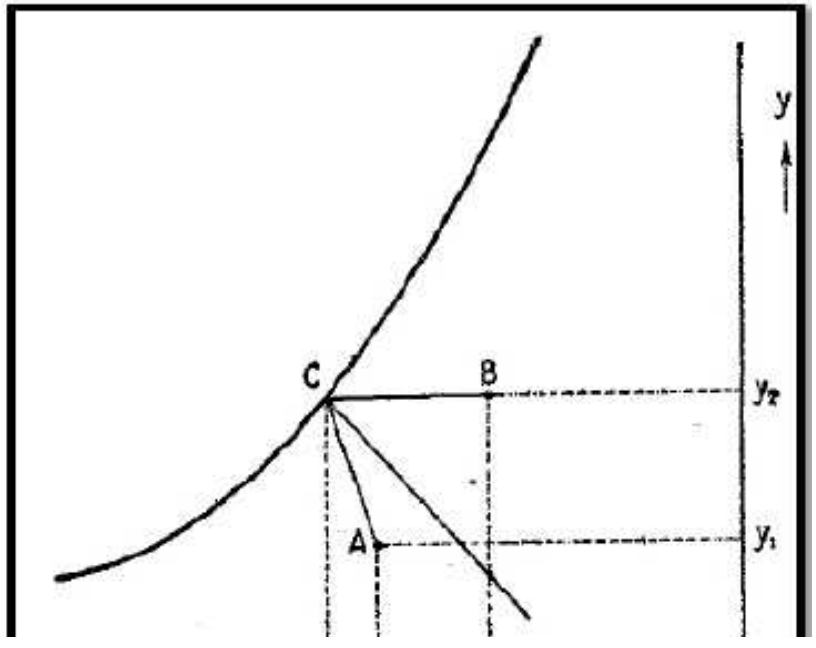
MÉTODOS DE HUMIDIFICACIÓN

e) Poniendo el gas en contacto con un sólido húmedo

En realidad este método, aunque puede conducir a la humidificación del aire, se emplea más con el objeto de secar el sólido que con el de humidificar el aire.

f) Poniendo el gas en contacto con un líquido que se mantenga a la temperatura de rocío del gas correspondiente a las condiciones de humedad que nos interesan

Si tenemos aire en las condiciones *A* y queremos llevarlo hasta las condiciones *B*, ha de mantenerse en contacto con agua que se mantenga a la temperatura *C*.
Para ello, ha de suministrársele igual cantidad de calor que la que absorberá el aire en forma de calor latente al humidificarse.
El aire pasará directamente de las condiciones *A* a la *C* y fuera del contacto con el agua hay que



HUMIDIFICACIÓN

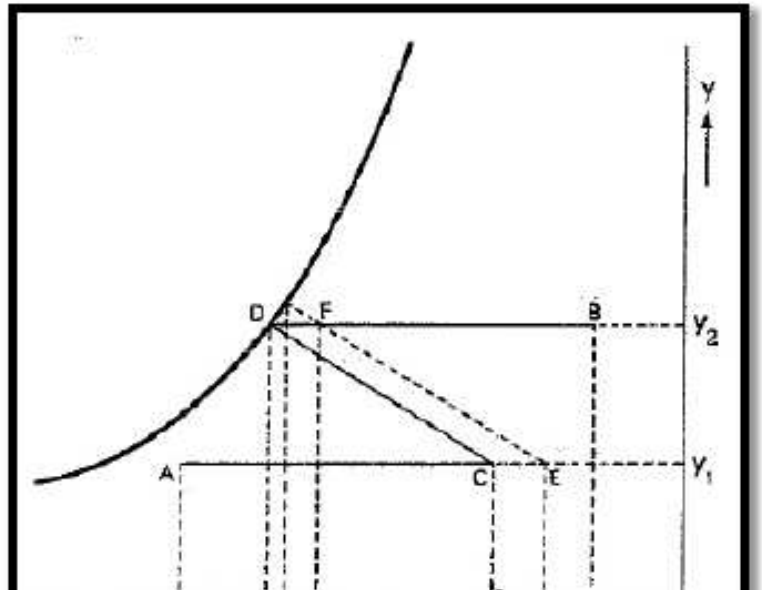
MÉTODOS DE HUMIDIFICACIÓN

g) Poniendo el aire en contacto con agua en una columna de humidificación adiabática

Este es el método de humidificación del aire más empleado en la práctica industrial.

En este proceso las condiciones de contacto entre el aire y el agua son tales que el **aire alcanza las condiciones de saturación adiabática** en contacto con el agua, que entra en el humidificador a la **temperatura de saturación adiabática del aire**.

Si disponemos aire en las **condiciones** *A* y queremos llevarlo hasta las condiciones indicadas por *B*, el proceso a realizar será el siguiente:



HUMIDIFICACIÓN

MÉTODOS DE HUMIDIFICACIÓN

Calentamiento del aire fuera del contacto con el agua

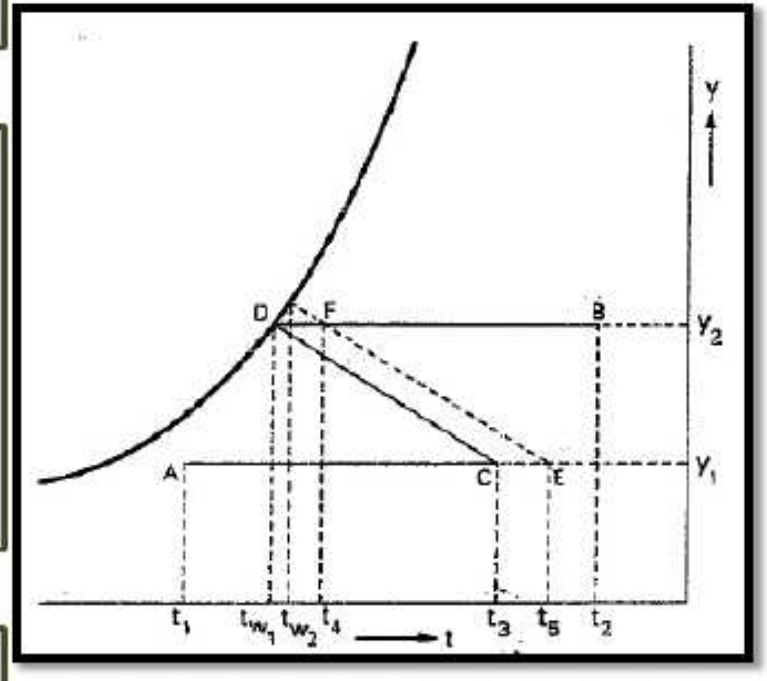
- Tramo AC- hasta la temperatura de saturación adiabática (t_3) correspondiente a la temperatura de rocío del aire en las condiciones *B*.

Introducción del aire en el humidificador adiabático

- Se introduce el aire caliente en el humidificador, en donde se satura en contacto con agua que se encuentra a una temperatura igual a la de saturación del aire. Parte del agua pasa al aire, saliendo el resto por la parte inferior del humidificador a la temperatura húmeda del aire.

Calentamiento del aire que sale del humidificador

- El aire que sale, con la humedad deseada (la de *B*) se calienta fuera del contacto con agua, hasta



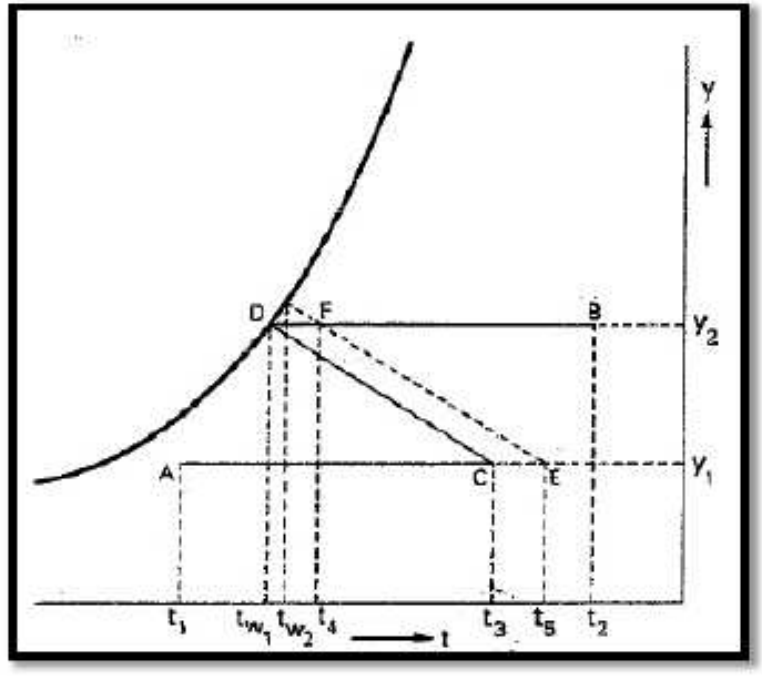
HUMIDIFICACIÓN

MÉTODOS DE HUMIDIFICACIÓN

En la práctica, el aire no sale saturado, sale con la humedad *Y2* (punto F).

Su temperatura de salida t_4 a la temperatura húmeda t_{w2} es superior a la temperatura de rocío correspondiente a las condiciones de *B*.

Para que salga con las condiciones de *F* ha de entrar a t_5, ligeramente superior a t_3, pero con igual temperatura húmeda que la del punto *F*.



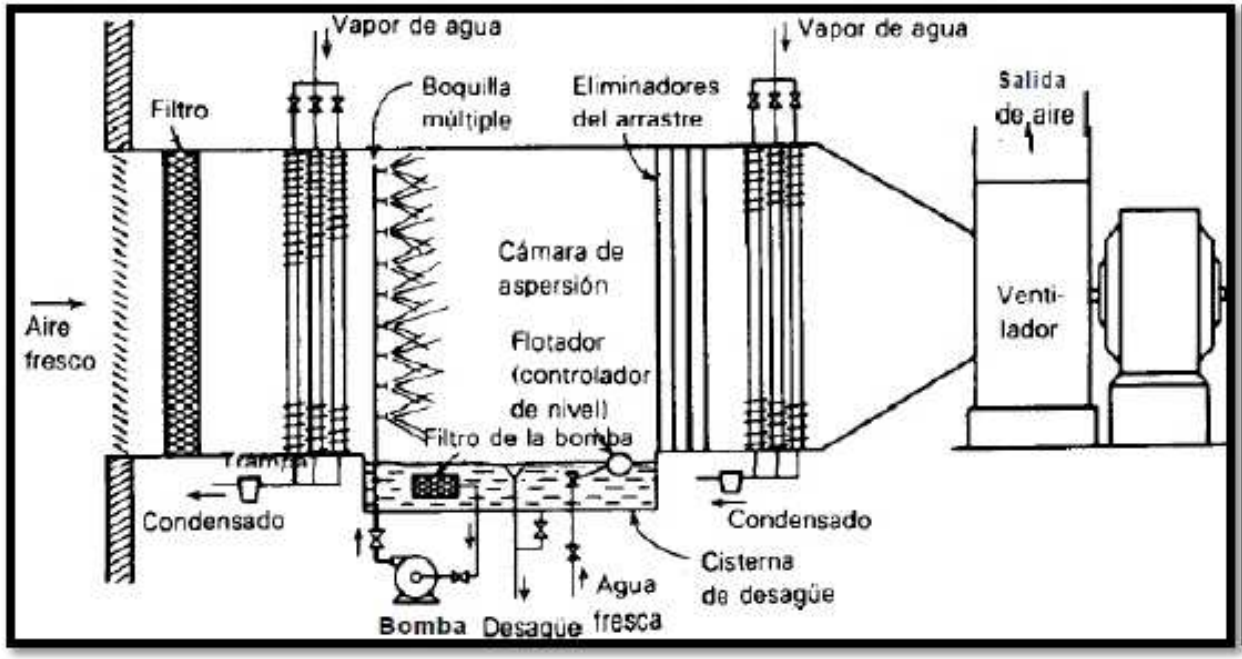
Para llevarlo de las condiciones *F* a las *B* hay que suministrarle la cantidad de calor necesaria, **fuera del contacto del agua.**

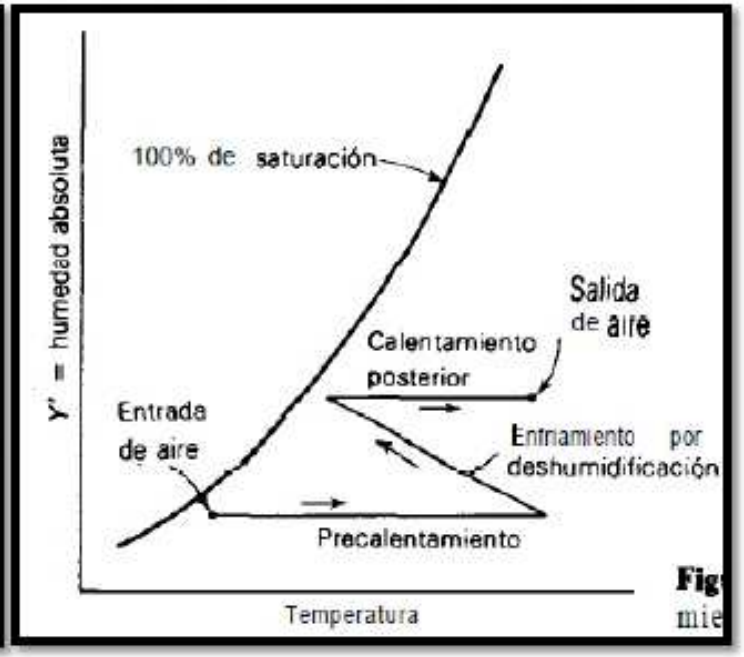
HUMIDIFICACIÓN

EQUIPO

CÁMARAS DE ASPERSIÓN(COLUMNA DE HUMIDIFICACIÓN)

Son básicamente torres aspersoras horizontales. Los **intercambiadores de calor** en la entrada y la salida permiten el pre y post calentamiento del aire.





HUMIDIFICACIÓN

MÉTODOS DE HUMIDIFICACIÓN

Ejemplo 4.19- Ocon Tojo

- Para un proceso se necesitan 5000 m^3/h de aire a 45°C con una humedad relativa del 30%. Se parte de aire a 20°C con humedad relativa del 50%, que se calienta, satura adiabáticamente y recalienta hasta 45°C. Calcúlese:
- a) La temperatura a que sale el aire del humidificador.
- b) La temperatura de pre-calefacción del aire.
- c) La cantidad total de calor suministrado.

HUMIDIFICACIÓN

MÉTODOS DE HUMIDIFICACIÓN

Ejemplo 4.20- Ocon Tojo

- Necesitamos disponer de aire a 55°C con una temperatura húmeda de 35°C, que preparamos en una instalación de acondicionamiento de aire a partir de aire atmosférico a 20°C con humedad relativa del 60%. El proceso completo consta de una pre-calefacción, seguida de una humidificación adiabática hasta que su humedad relativa es del 90%, y calefacción final hasta las condiciones que nos interesan. Calcúlese:
- a) La temperatura de salida del aire del humidificador.
- b) La temperatura de pre-calefacción.
- c) La cantidad de calor suministrado por metro cubico de aire medico en las condiciones finales.

HUMIDIFICACIÓN

DESHUMIDIFICACIÓN DEL AIRE

Se lleva a cabo **enfriando la masa de aire** hasta una temperatura para la cual la **humedad de saturación** sea la **requerida**.

Por contacto indirecto

Poniendo en contacto con una **superficie metálica** a una **temperatura inferior** a la **temperatura de rocío** del aire.

La masa de aire se va enfriando hasta alcanzar las **condiciones de saturación**.

La temperatura hasta la que ha de enfriarse la masa de aire será la **temperatura de rocío** para la cual la **humedad final sea la deseada.**

Por contacto directo con agua fría

Se pone **aire húmedo** en contacto con **agua a temperatura inferior** que la **temperatura de rocío del aire** , el aire se **enfría** perdiendo **calor sensible** y **calor latente**, mientras que el agua **eleva su temperatura**.

En el límite el aire alcanza las **condiciones de saturación** correspondientes a la temperatura del agua, **considerando un rendimiento de la torre de 100%**.

HUMIDIFICACIÓN

ENFRIAMIENTO DEL AGUA POR EVAPORACIÓN

Se realiza con el fin de **llevar el agua a su temperatura primitiva** para que pueda entrar nuevamente a prestar servicio en un proceso fabril.

Se lleva a cabo poniéndola en **contacto íntimo** con una corriente de aire cuya **temperatura húmeda** sea **inferior a la del agua**.

El agua se enfría por **evaporación** y también por **transmisión de calor sensible al aire** si la temperatura de este e inferior.

A medida que asciende la temperatura del aire **aumenta su humedad** y **desciende la temperatura del agua**.

La temperatura límite de enfriamiento del agua es la **temperatura húmeda del aire correspondiente a las condiciones de entrada a la torre** por la parte inferior de la misma, ya que el contacto se efectúa en **contracorriente**.

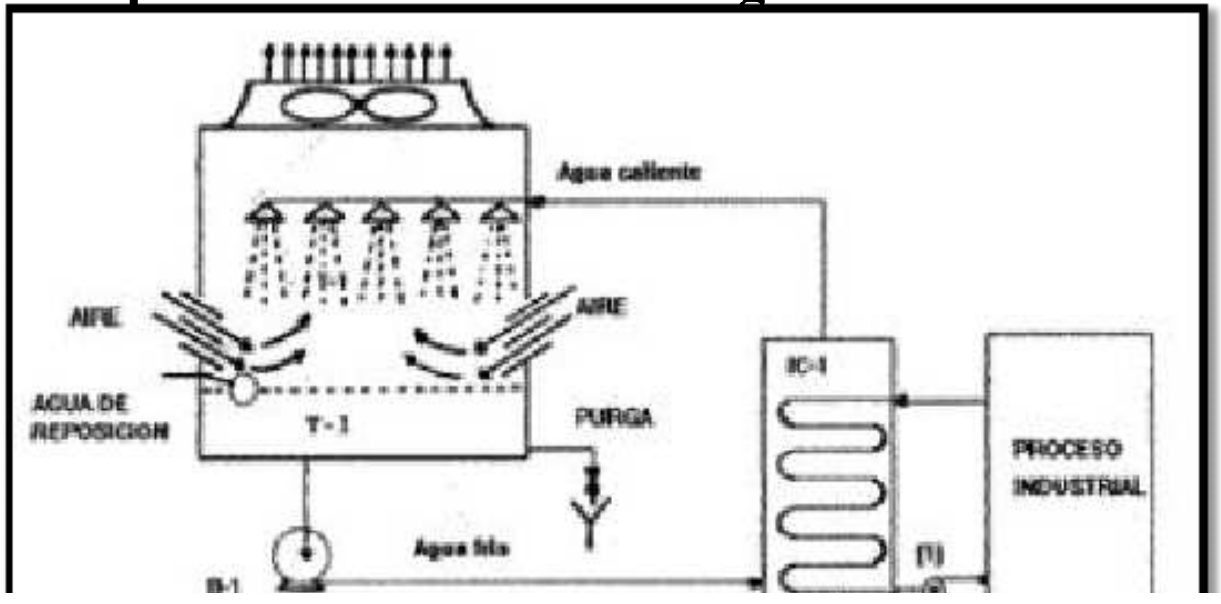
HUMIDIFICACIÓN

EQUIPO

TORRES DE ENFRIAMIENTO

Son estructuras para **refrigerar agua** a **temperaturas altas,** empleadas para el **contacto continuo** del **líquido y del gas**.

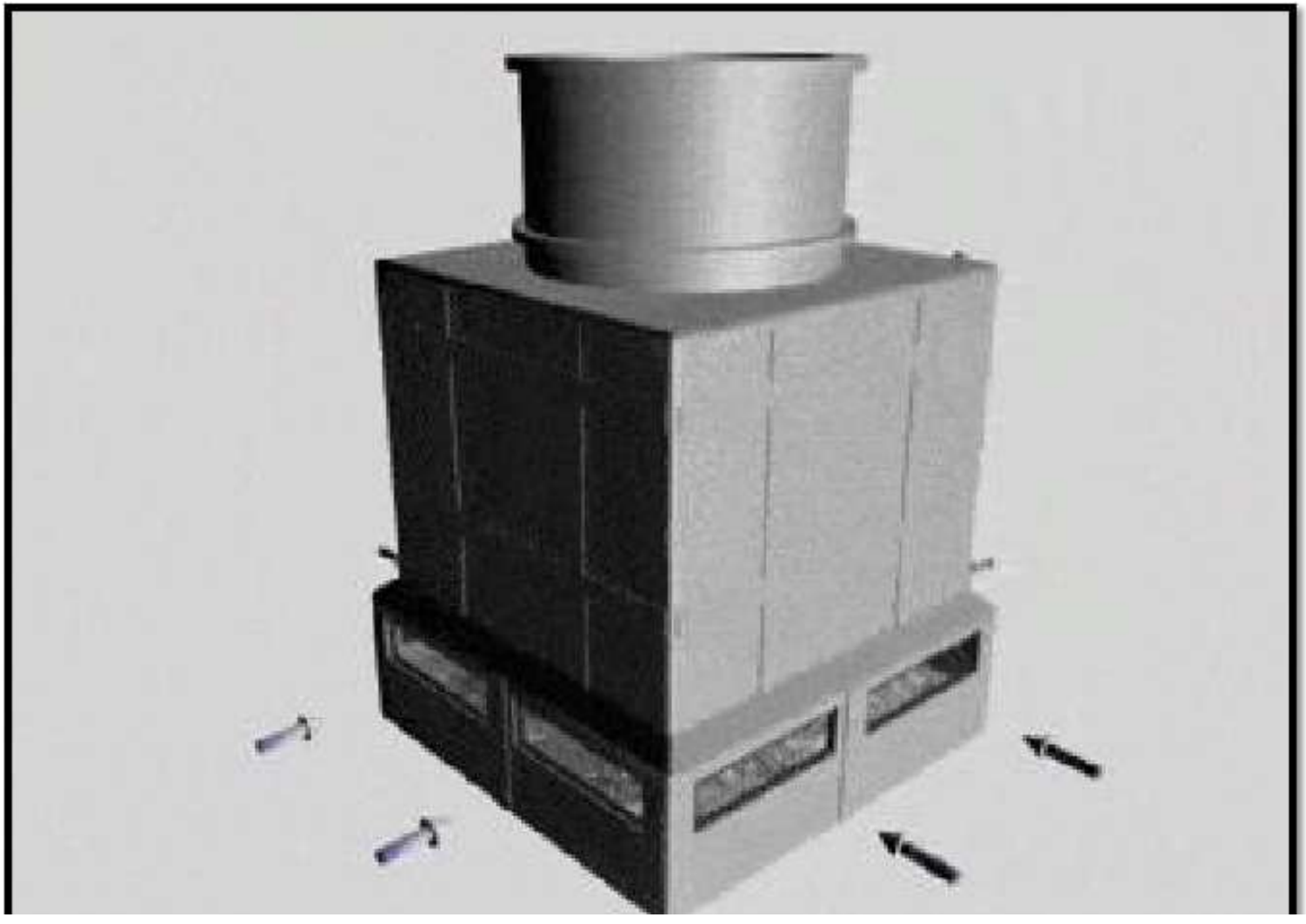
Son **columnas verticales** con **empaques** o con dispositivos de **superficie grande.** El líquido se **distribuye** sobre éstos y escurre hacia abajo, a través del **lecho empacado** exponiendo una **gran superficie al contacto con el gas.**



HUMIDIFICACIÓN

EQUIPO

TORRES DE ENFRIAMIENTO

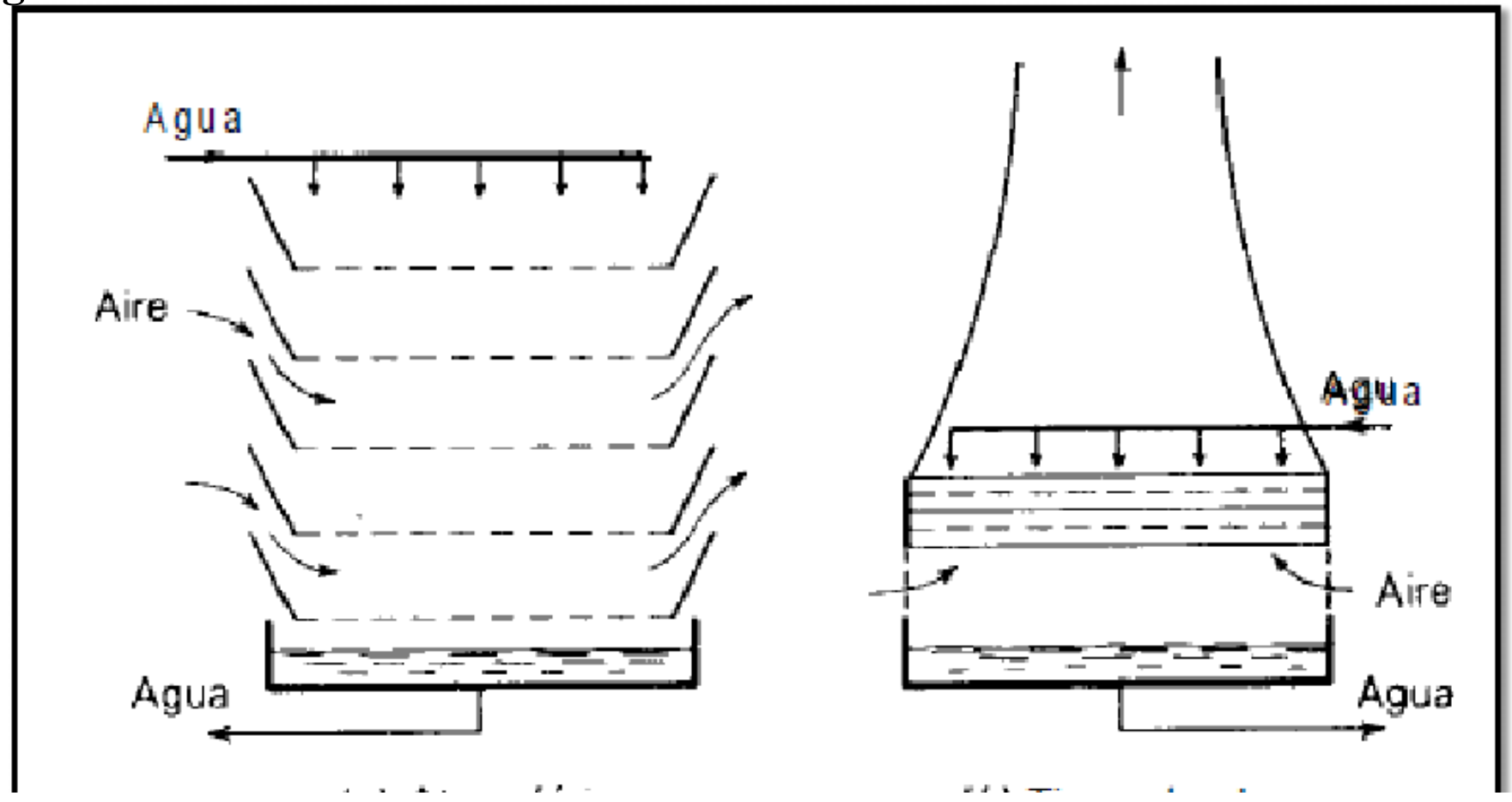


HUMIDIFICACIÓN

EQUIPO

TORRES DE ENFRIAMIENTO

Arreglos más comunes

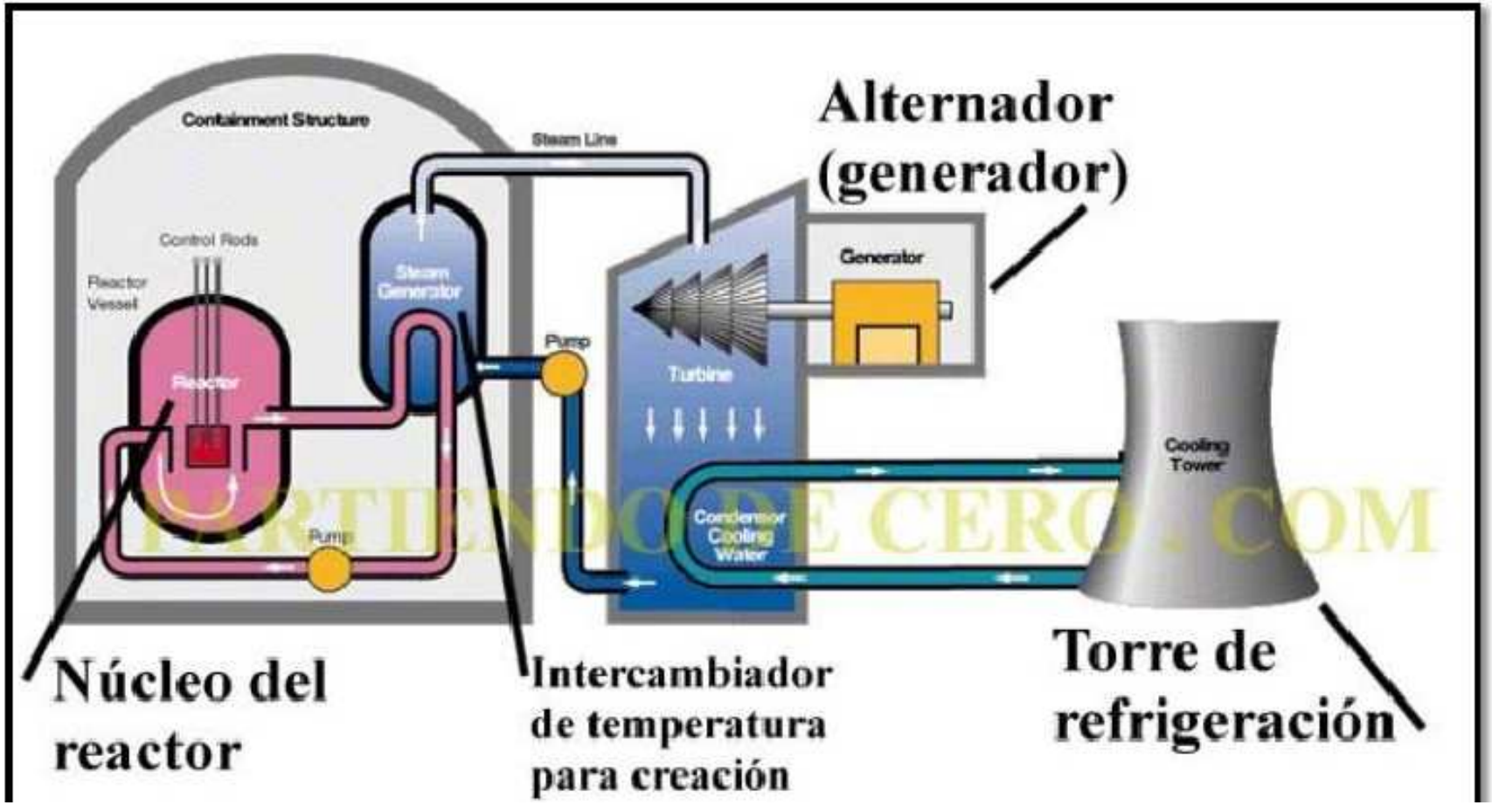


HUMIDIFICACIÓN

EQUIPO

TORRES DE ENFRIAMIENTO

Arreglos más comunes

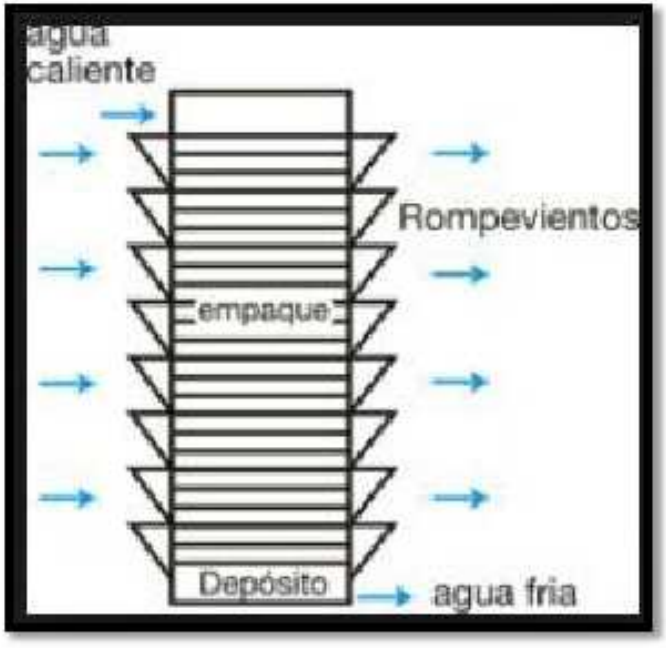


HUMIDIFICACIÓN

EQUIPO

TORRES DE ENFRIAMIENTO

Arreglos más comunes

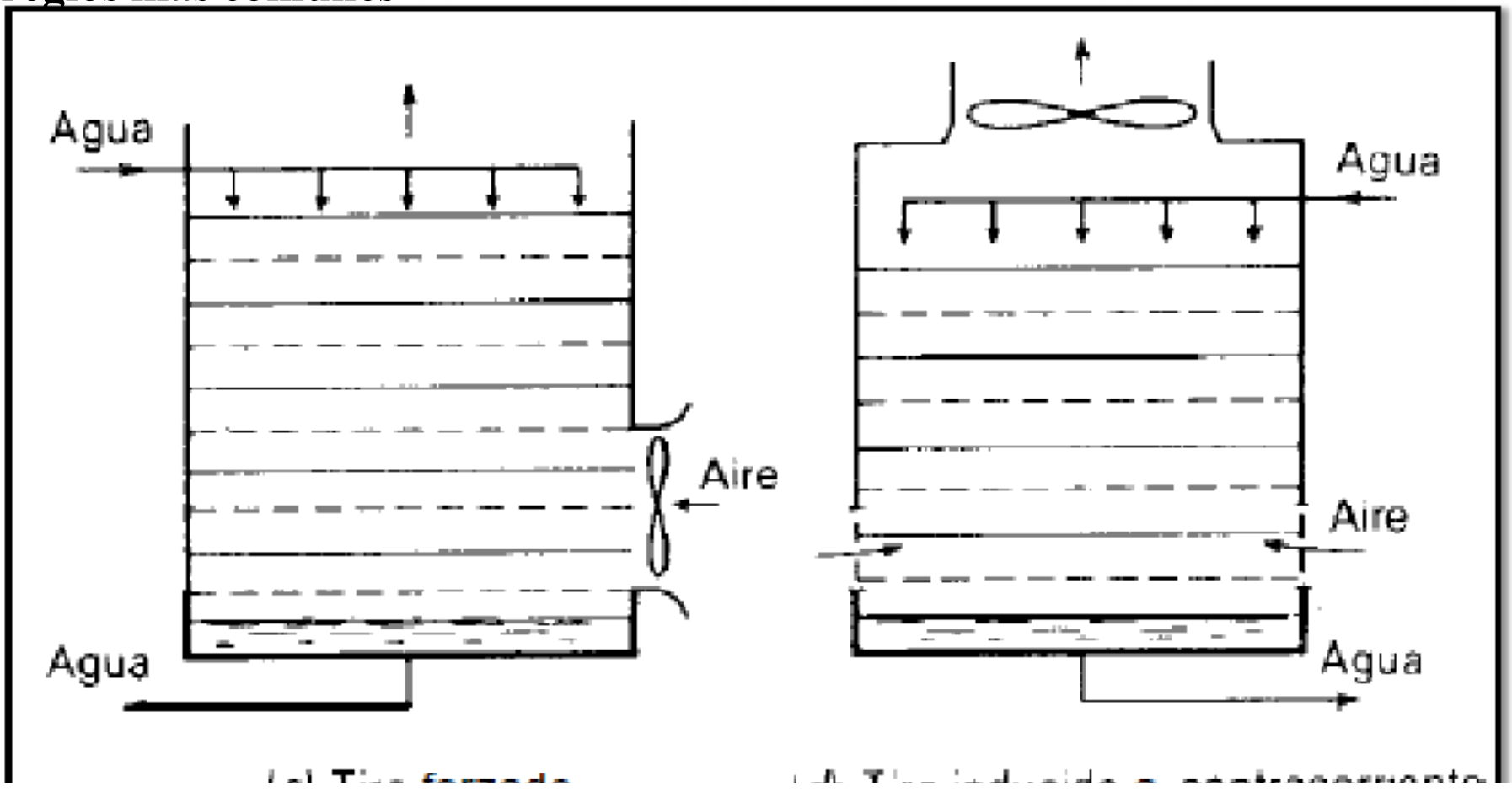


HUMIDIFICACIÓN

EQUIPO

TORRES DE ENFRIAMIENTO

Arreglos más comunes

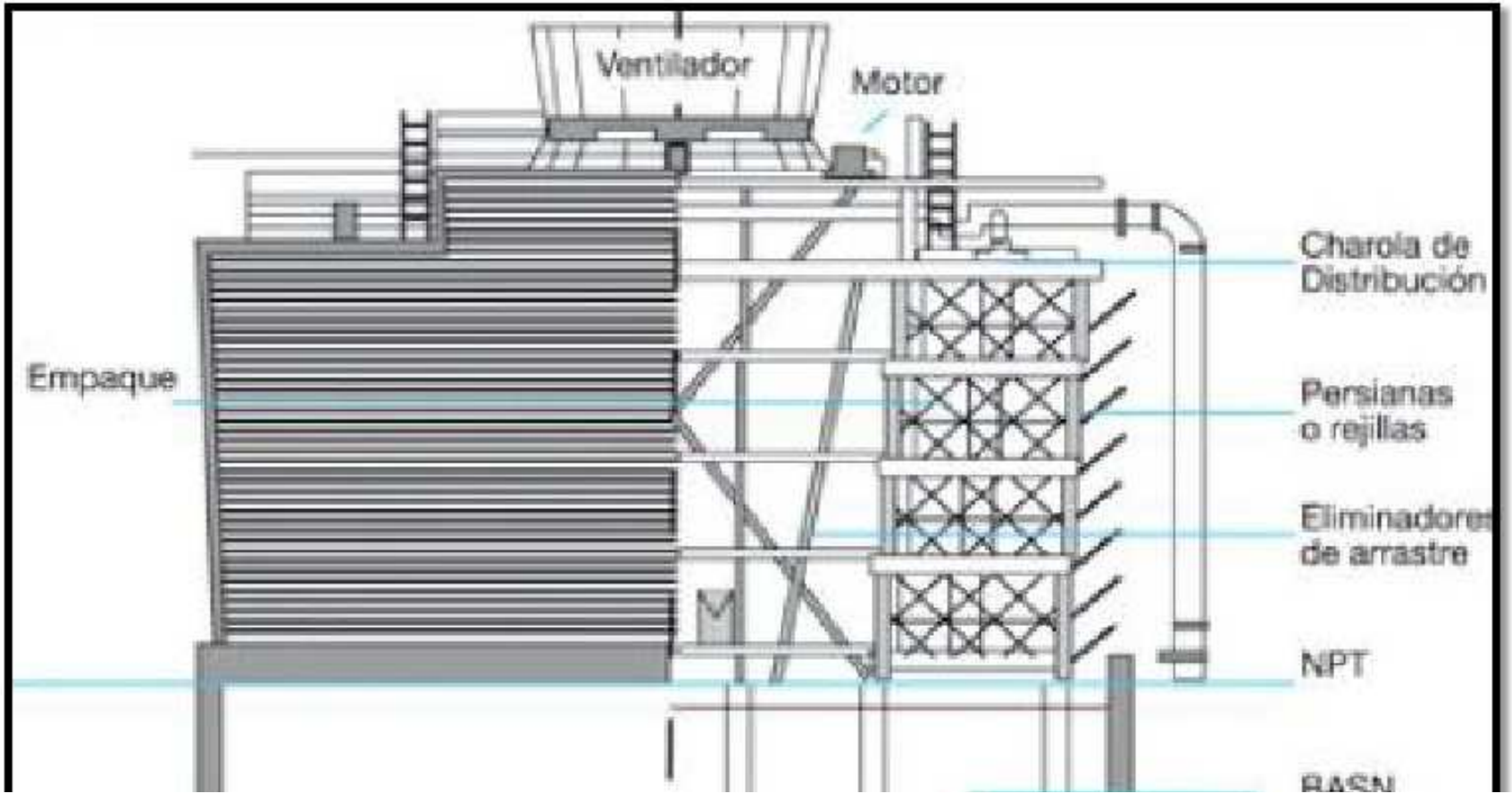


HUMIDIFICACIÓN

EQUIPO

TORRES DE ENFRIAMIENTO

Arreglos más comunes



HUMIDIFICACIÓN

EQUIPO

TORRES DE ENFRIAMIENTO

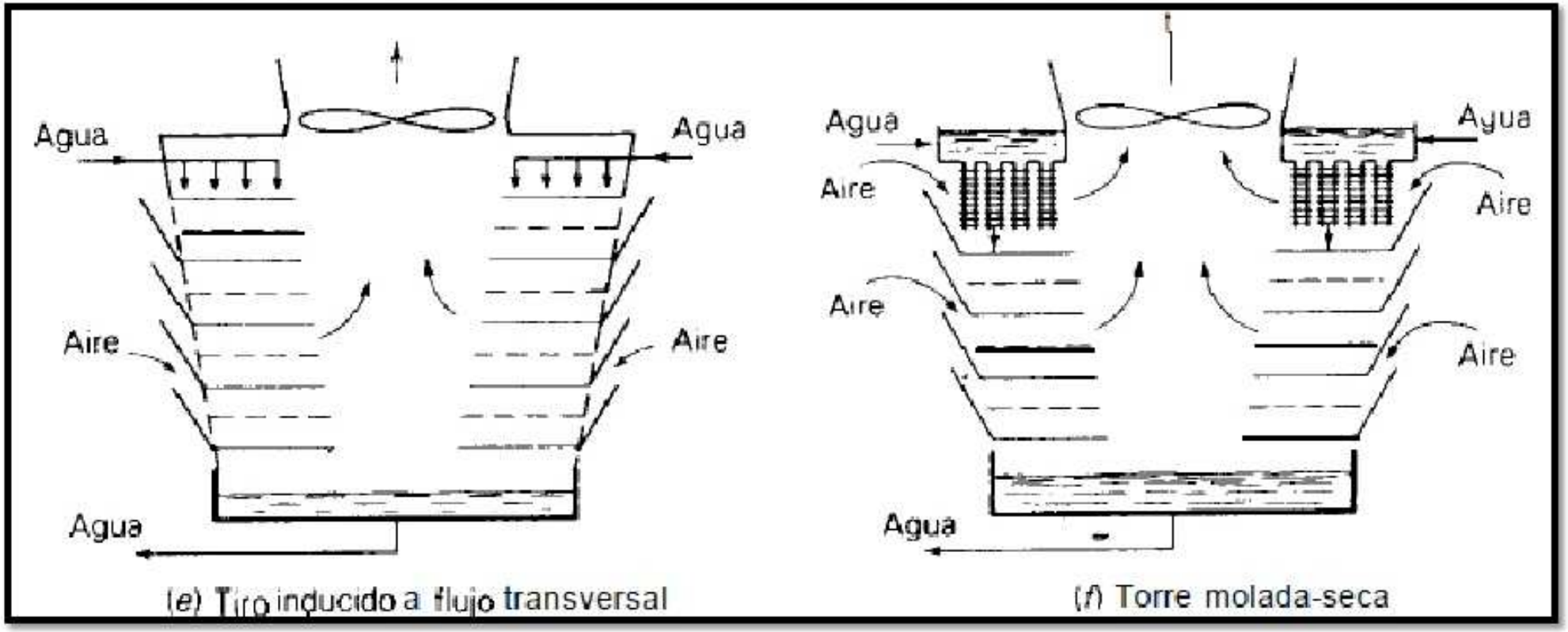
Arreglos más comunes

HUMIDIFICACIÓN

EQUIPO

TORRES DE ENFRIAMIENTO

Arreglos más comunes



(e) Tiro inducido a flujo transversal

(f) Torre molada-seca

HUMIDIFICACIÓN

EQUIPO

TORRES DE ENFRIAMIENTO

Empaque

Superficie interfacial grande entre el líquido y el gas.

Debe permitir el paso de grandes volúmenes de fluido a través de pequeñas secciones transversales de la torre sin recargo o inundación.

Debe ser baja la caída de presión del gas.

Debe ser químicamente inerte con respecto a los fluidos que se están procesando.

Ser estructuralmente fuerte para permitir el fácil manejo e instalación.

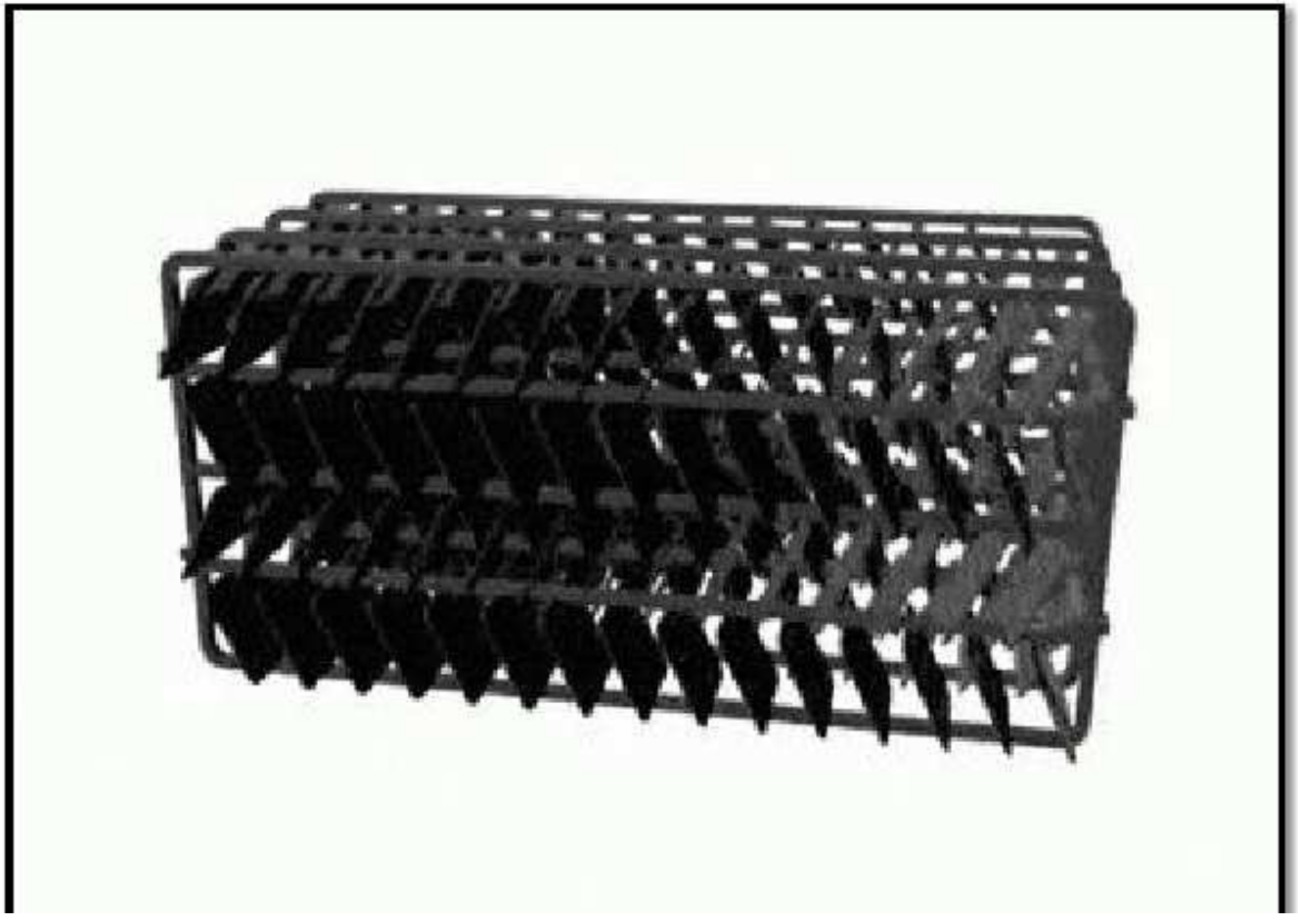
Tener bajo costo.

HUMIDIFICACIÓN

EQUIPO

TORRES DE ENFRIAMIENTO

Empaque

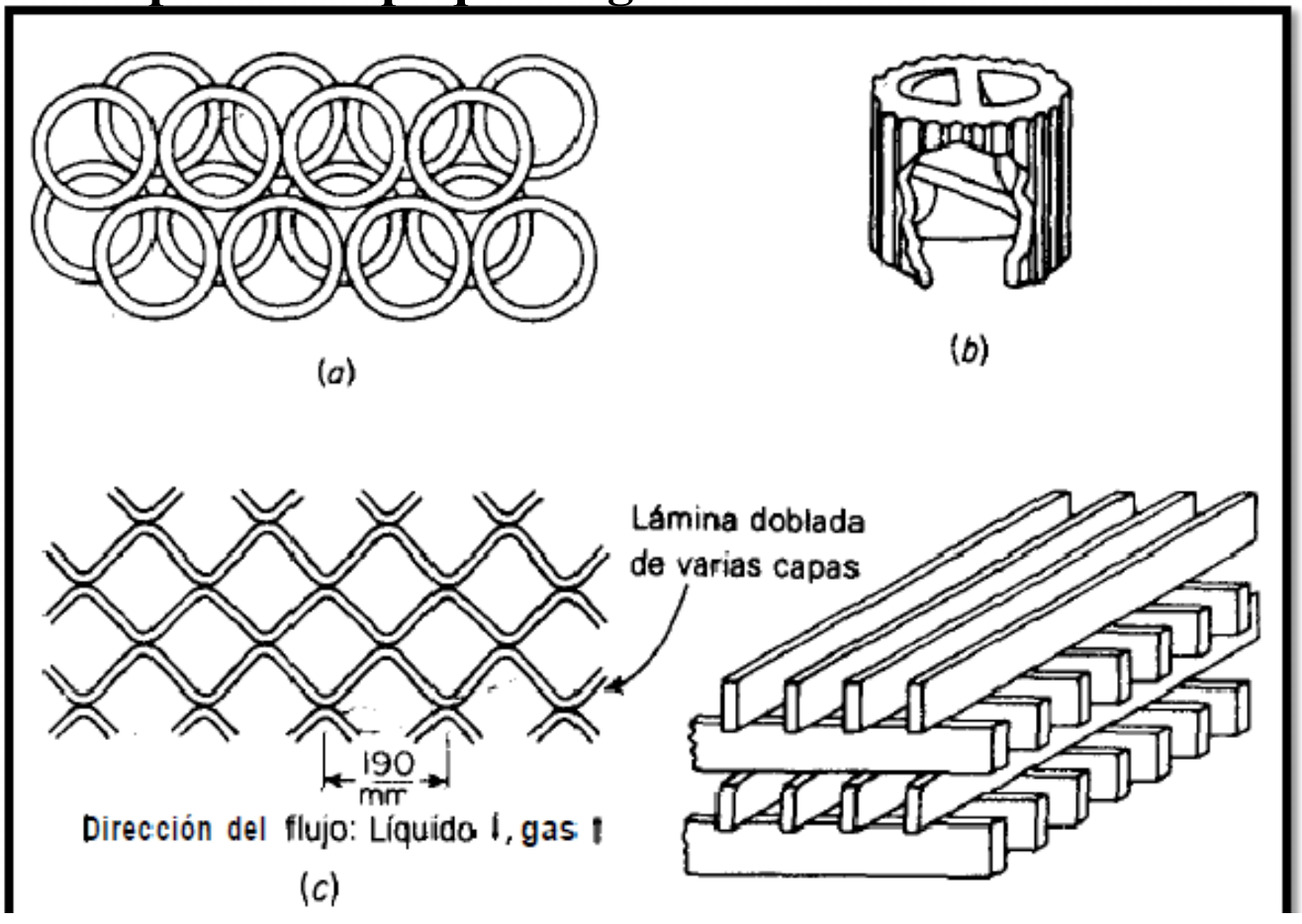


HUMIDIFICACIÓN

EQUIPO

TORRES DE ENFRIAMIENTO

Empaque- otros tipos de empaques regulares



HUMIDIFICACIÓN

EQUIPO

ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO

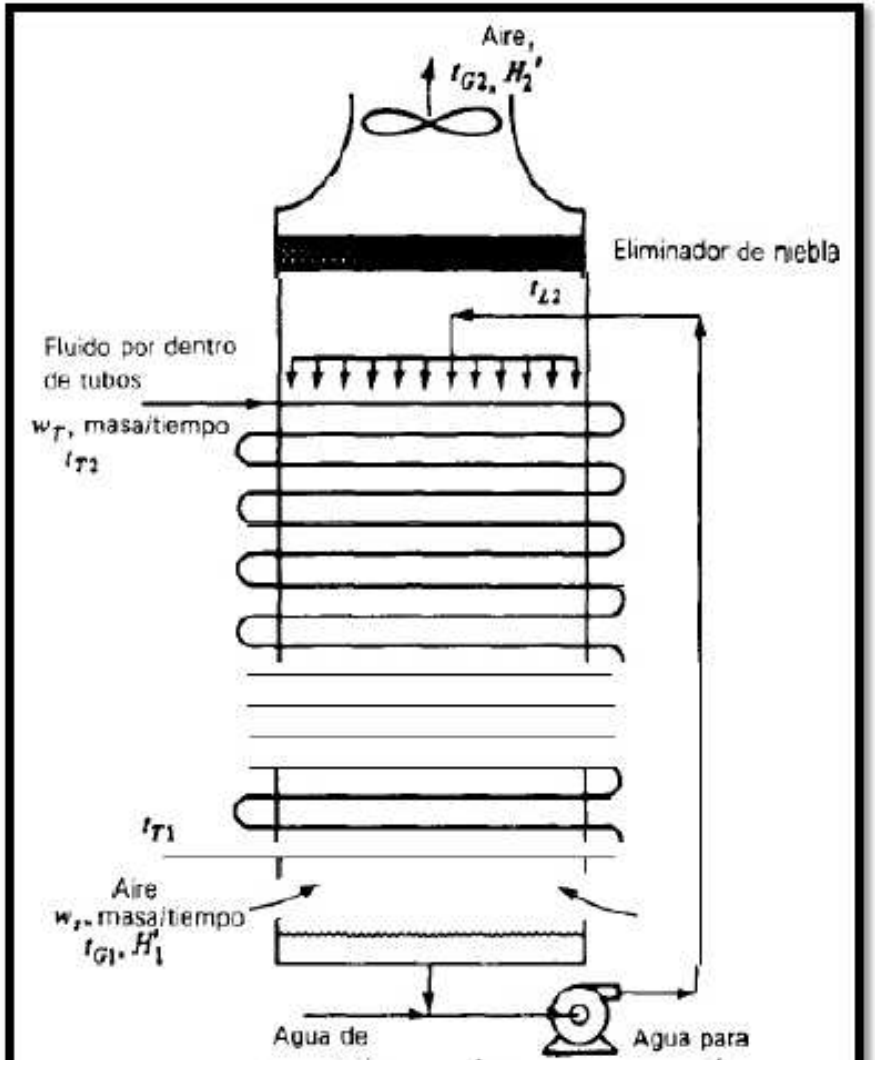
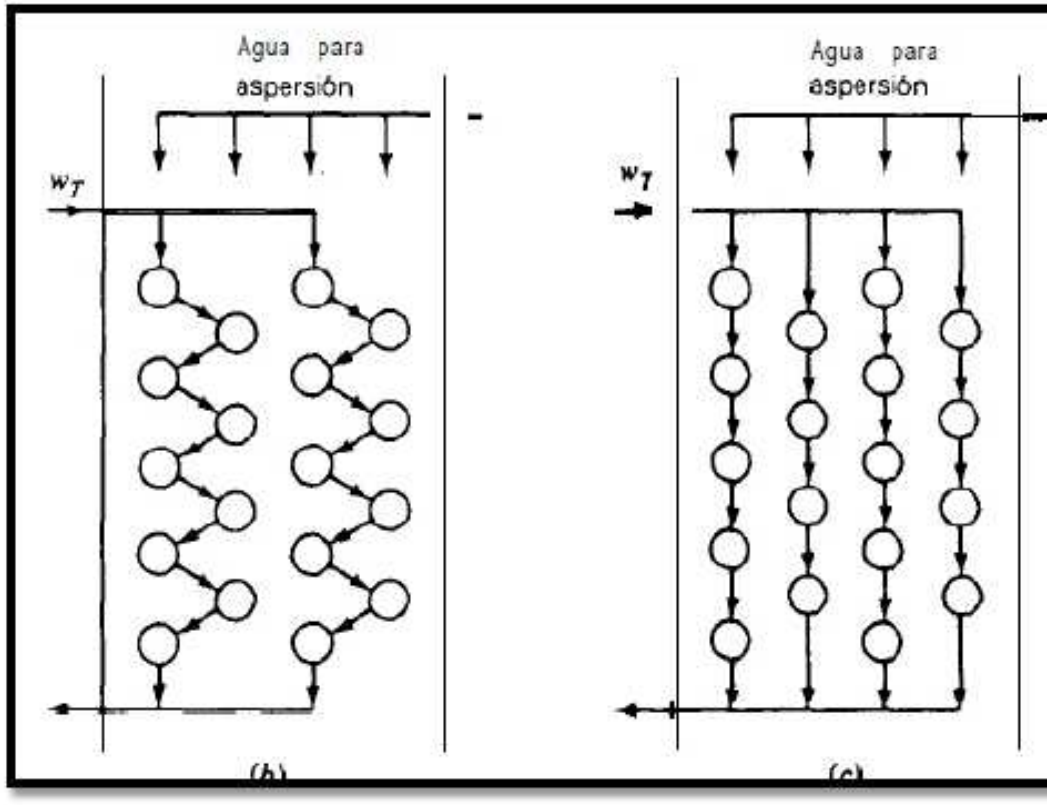
En el **enfriamiento por evaporación**, se **enfría un fluido** cuando este **fluye a través de un tubo**.

El agua **fluye en forma de una película** o una **aspersión** alrededor del **exterior del tubo**.

Se **burbujea aire en el agua** para acarrear el calor eliminado del fluido dentro del tubo.

Por lo tanto, se aprovecha la **elevada rapidez de transferencia de calor** que resulta cuando el agua dispersada se **evapora en una corriente de aire**.

HUMIDIFICACIÓN

EQUIPO

ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO